

## Modulul 5

### OPTICĂ ONDULATORIE

**Conținutul modulului:**

- 5.1 Generalități**
- 5.2 Reflexia și refracția luminii**
- 5.3 Interferența luminii**
- 5.4 Difracția luminii**
- 5.5 Difuzia luminii**
- 5.6 Dispersia luminii**
- 5.7 Polarizarea luminii**

**Evaluare:**

- 1. Definirea mărimilor fizice și precizarea unităților lor de măsură**
- 2. Enunțul și formula legilor fizice studiate**
- 3. Răspunsuri la întrebările finale**

#### 5.1 Generalități

După cum se știe, un segment îngust (aproximativ  $0,35 - 0,75\mu\text{m}$ , pe scara lungimilor de undă) din spectrul undelor electromagnetice are proprietatea că impresionează retina ochiului uman și este denumit lumină vizibilă. Proprietățile undelor electromagnetice, în general, sunt astfel și proprietăți ale undelor luminoase, și, în continuare, vom aborda studiul unora dintre acestea cu referire concretă la undele luminoase (*optica electromagnetică*).

Fenomenele manifestate de undele electromagnetice (în particular, luminoase) în cursul propagării prin diferite medii sunt determinate, în ultimă instanță, de interacțiunea dintre câmpurile electric și magnetic ale unde electromagnetice și sarcinile electrice din atomii substanței (în particular, electronii de pe straturile periferice ale acestora). Cercetând cei doi termeni ai forței (4.91) cu care acționează unda electromagnetică asupra unei sarcini, se poate arăta că componenta electrică este de  $c/v$  ori mai mare decât cea magnetică, în care  $v$  este viteza de mișcare a sarcinii, iar  $c$  este viteza luminii în vid. Rezultă că, practic, vectorul câmp electric al unde electromagnetice este cel care determină fenomenele luminoase și de aceea I se spune și vector luminos.

Trebuie menționat că deși o seamă de fenomene cum sunt reflexia, refracția, interferența, difracția, dispersia, polarizarea etc se explică ținând seama de natura ondulatorie electromagnetică a luminii, pentru altele, cum sunt emisia și absorbția luminii, trebuie să se ia în seamă manifestarea corpusculară, fonică a acesteia.

*Optica ondulatorie* ține seama de caracterul de undă al luminii, iar în paragrafele care urmează ne vom referi la fenomenele luminoase explicate ținând seama că lumina este o undă electromagnetică.

Se știe că propagarea undelor se descrie nu prin traiectorie, ci prin *suprafețe de undă* ( vezi modulul 2). Suprafața de undă corespunzătoare unui maxim al oscilației este denumită *front de undă* ( de exemplu, crestele undelor circulare ce se formează pe suprafața unui lac liniștit când cade un obiect mic în apă). Direcția de propagare a unei unde este indicată de *raza unde*. Folosind conceptul de rază de lumină, o seamă de fenomene fizice poate fi descrisă în cadrul *opticii geometrice*.

## 5.2 Reflexia și refracția luminii

Dacă o undă luminoasă întâlnește suprafața de separație dintre două medii transparente ( aer-sticlă, aer- apă,etc) unda suferă *reflexie* și *refracție*. *Reflexia constă în întoarcerea unde (parțial) în mediul din care a venit, iar refracția (transmisia) constă în schimbarea direcției de propagare a unde*. În cursul reflexiei și refracției *frecvența  $f$  a unde nu se modifică*. Lungimea de undă însă se modifică deoarece viteza de propagare a unde variază de la un mediu la altul; față de vid, lungimea de undă într-un material este:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{v}{c/\lambda_o} = \frac{\lambda_o}{n} \quad (5.1)$$

în care  $v$  este viteza de propagare a unde cu frecvența  $f$  în material,  $c$  este viteza luminii în vid,  $\lambda_o$  este lungimea de undă a luminii în vid, iar  $n$  este indicele de refracție al materialului.

*Prima lege a reflexiei (refracției) afirmă că raza incidentă, raza reflectată ( respectiv refractată) și normala la suprafața de separație sunt coplanare. (fig.5.1 ).*

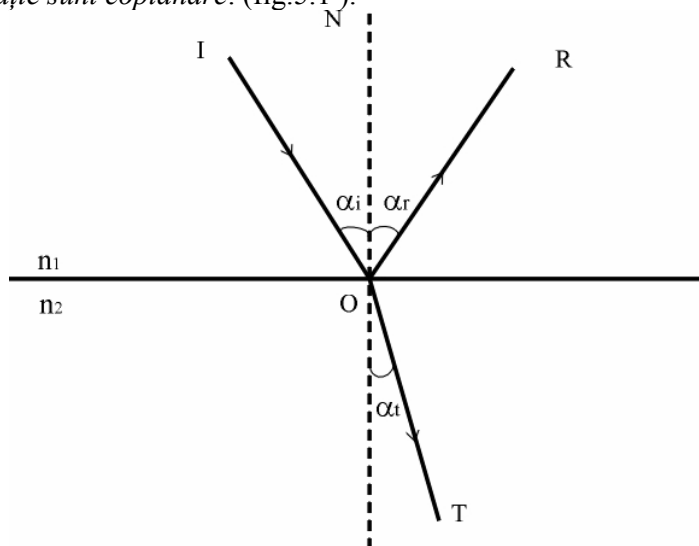


Fig.5.1

Unghiul  $\alpha_i$  dintre raza incidentă... și normala la suprafața de separație... se numește unghi de incidență, unghiul  $\alpha_r$  dintre raza reflectată... și normală este unghi de reflexie, iar unghiul  $\alpha_t$  dintre raza refractată... și normală este unghi de refracție. *A doua lege a reflexiei afirmă că unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie:*

$$\alpha_i = \alpha_r \quad (5.2)$$

*Legea a doua a refracției (Snellius - Descartes) stabilește că*

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_t} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (5.3)$$

în care  $v_1$  și  $v_2$  sunt vitezele luminii în mediile 1 și respectiv 2,  $n_1$  și  $n_2$  sunt indicii de refracție absoluți ai celor două medii, iar  $n_{21}$  este indicele de refracție relativ al mediului 2 față de mediul 1.

Descrierea propagării undelor reflectate și refractate se poate face cu ajutorul principiului lui Huygens: orice punct atins de frontul de undă devine sursa unor unde secundare iar noul front de undă este dat de înfășurătoarea (suprafața tangentă) undelor secundare (fig.5.2).

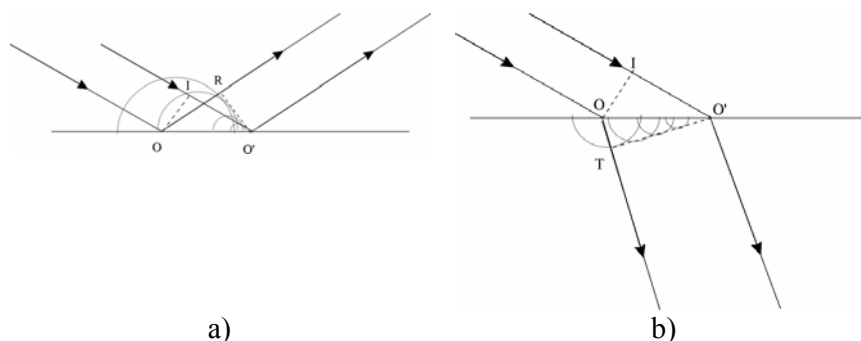


Fig. 5.2

Mersul razelor de lumină între două puncte dintr-o regiune în care indicele de refracție este variabil poate fi dedus cu ajutorul *principiului lui Fermat: o rază de lumină, trecând de la un punct la altul, va urma acel drum care, comparat cu drumurile alăturate, va necesita un timp extrem (de obicei, minim)*. Evaluarea timpului presupune atât exprimarea drumului geometric cât și a vitezei de propagare a luminii în mediu; mărimea fizică ce ține seama simultan de cele două este *drumul optic: produsul dintre lungimea drumului geometric și indicele de refracție al mediului*. În acest fel principiul lui Fermat poate fi enunțat prin cerința ca drumul optic să fie un extrem (minim, de obicei).

Dacă lumina trece dintr-un mediu optic mai dens într-un altul mai puțin dens ( $n_2 < n_1$ ), din legea refracției (5.3) rezultă  $\sin \alpha_t > \sin \alpha_i$ . În acest caz, pentru o anumită valoare a unghiului de incidență  $\alpha_i = \alpha_l$ , unghiul de refracție poate atinge valoarea  $\alpha_t = \pi/2$ .

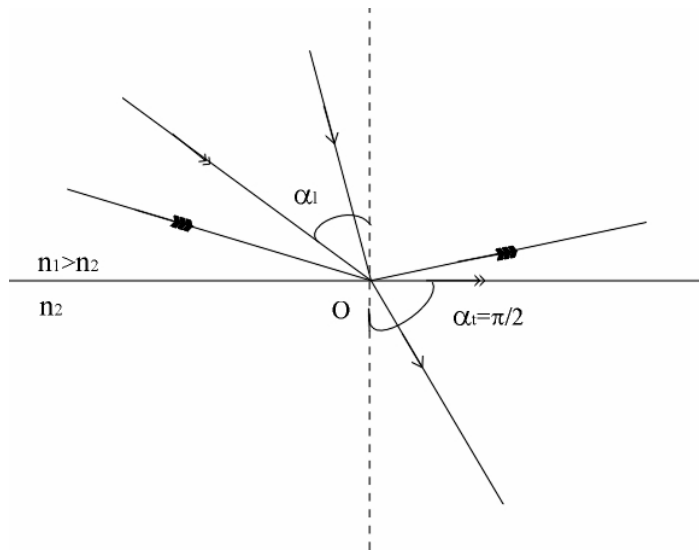


Fig. 5.3

Pentru unghiuri de incidență mai mari ca  $\alpha_l$ , raza refractată nu mai trece în mediul al doilea și se produce fenomenul de *reflexie totală* sau *reflexie internă* (fig. 5.3).

Unghiul minim de incidență  $\alpha_l$  de la care se întâmplă acest fenomen se numește *unghi limită* și valoarea sa se obține din relația (5.3) în care  $\alpha_t = \pi/2$ :

$$\sin \alpha_l = \frac{n_2}{n_1} \quad (5.4)$$

Pentru o pereche de medii transparente adiacente, unghiul limită are o valoare bine determinată, depinzând de indicii de refracție ai celor două medii.

Fenomenul de reflexie totală are numeroase aplicații, una dintre acestea fiind prisma cu reflexie totală. Pentru o sticlă cu indicele de refracție  $n_s = 1,52$ , la suprafața de separație sticlă-aer ( $n_{aer} \cong 1$ ) se produce reflexie totală pentru unghiuri de incidență mai mari ca unghiul limită  $\alpha_l \cong 41^\circ$ ; o rază de lumină care străbate o prismă având secțiunea triunghi dreptunghic isoscel (cu unghiurile  $45^\circ$ - $90^\circ$ - $45^\circ$ ) ca în fig. 5.4 suferă reflexie totală. O astfel de prismă prezintă avantaj față de oglinzile metalice deoarece nici o suprafață metalică nu reflectă 100% lumina incidentă. O altă aplicație deosebit de importantă sunt fibrele optice. O fibră dintr-un mediu transparent (masă plastică, sticlă), înconjurată de un alt mediu cu indice de refracție mai mic, poate transmite o rază de lumină de la un capăt al său la altul, prin reflexie totală, chiar îndoită fiind, (fig 5.5) cu condiția ca să se mențină incidența razei pe peretele fibrei la unghiuri mai mari ca unghiul limită. Fibrele optice sunt azi folosite pe scară largă în telecomunicații, medicină etc.

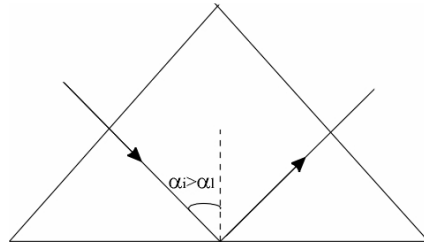


Fig. 5.4

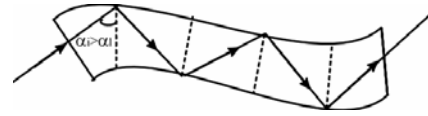


Fig. 5.5

Se pot stabili și corelații între amplitudinea undelor reflectată, transmisă și incidentă ( respectiv între intensități) dar această problemă nu face obiectul studiului nostru.

### 5.3 Interferența luminii

Două sau mai multe unde luminoase se pot suprapune într-un anumit loc din spațiu. Dacă intensitatea în domeniul de suprapunere variază trecând prin maxime și minime se spune că se produce *interferență*. Pentru explicarea condițiilor de producere a interferenței trebuie să ținem seamă că la suprapunerea undelor se adună elongațiile câmpurilor fiecărei unde ( și nu intensitățile lor).

*Undele*, care în acest caz interferă, se numesc *coerente* iar *sursele* care le emit sunt de asemenea *coerente*.

Sursele reale de lumină nu sunt surse coerente ( excludem aici sursele laser). Radiația emisă de aceste surse rezultă în urma tranzițiilor care au loc în atomii constituenți; aceștia emit independent unul de altul, fără nici o corelație între ei, orientarea vectorilor câmp electric fiind haotică.

Obținerea undelor coerente pentru realizarea interferenței se face separând din fluxul luminos emis de o sursă monocromatică două fascicule de lumină care ulterior se suprapun din nou în zona de interferență. În acest scop se utilizează numeroase dispozitive, care se încadrează în două metode:

- metoda divizării frontului de undă ( exemplu: dispozitivul lui Young);
- metoda divizării amplitudinii (exemplu: lama cu fețe plan paralele).

Dispozitivul lui Young constă dintr-o sursă de lumină monocromatică ( un bec cu incandescență, având un filtru în fața sa) urmat de un paravan prevăzut cu două fante dreptunghiulare și paralele  $S_1$  și  $S_2$  și apoi un ecran pe care se observă interferența. Conform principiului lui Huygens, punctele de pe frontul de undă care atinge fantele emit noi unde, cele două fante devenind surse coerente, deoarece undele emise de ele provin de pe aceeași suprafață de undă.(fig.5.6).

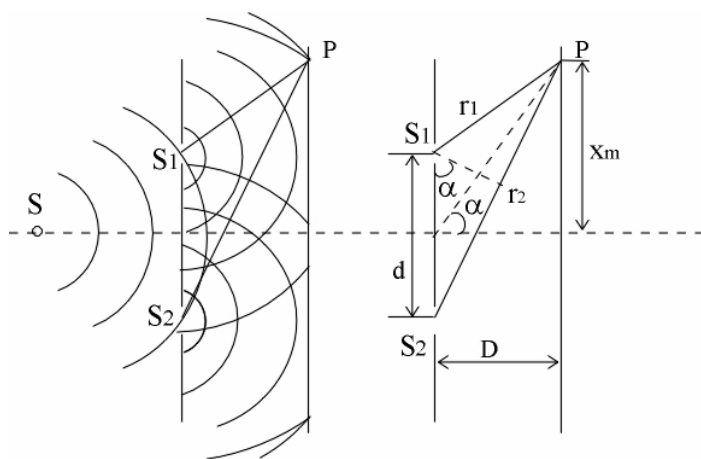


Fig. 5.6

Fie  $d$  distanța dintre fante,  $r_1$  și  $r_2$  distanțele de la fante până la un punct oarecare de pe ecranul aflat la distanța  $D$  de paravan.

Se observă că intensitatea luminoasă va fi maximă în punctul P atunci când diferența de drum  $r_2 - r_1 = 2m \frac{\lambda}{2}$ , unde  $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$  și va fi minimă (în acest caz, nulă) când diferența de drum  $r_2 - r_1 = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$ .

Ca rezultat al interferenței, pe ecran vor apărea *franje* luminoase alternând cu altele întunecoase (maxime și minime) paralele cu fantele. Distanța dintre două franje luminoase (întunecoase) succesive se numește *interfranjă*. Distanța  $x_m$  a franjei luminoase de ordinul  $m$  față de planul de simetrie al dispozitivului se poate determina observând că  $\tan \alpha = x_m / D$  și  $\sin \alpha = (r_2 - r_1) / d = m\lambda / d$ . Dar cum unghiul  $\alpha$  este mic :  $\tan \alpha \cong \sin \alpha$ , se obține:

$$x_m = \frac{mD\lambda}{d} \quad (5.11)$$

Interfranja este distanța dintre două maxime succesive:

$$i = x_{m+1} - x_m = \frac{D\lambda}{d} \quad (5.12)$$

Dacă spațiul dintre paravanul cu fante și ecran este un mediu cu indicele de refracție  $n$ , în locul drumului geometric  $r$  intervine drumul optic :  $(r) = nr$ .

Lama cu fețe plan-paralele. Fie o lamă de grosime  $d$  și indice de refracție  $n$  pe care cade o rază de lumină (1) sub unghiul de incidență  $\alpha_i$ . (fig.5.7).

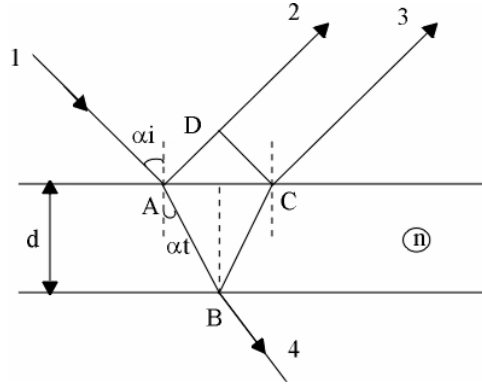


Fig. 5.7

După reflexii pe fața superioară și pe cea inferioară a lamei, se obțin razele (2) și (3) care sunt coerente provenind din aceeași undă, dar sunt defazate deoarece parcurg drumuri optice diferite după separarea lor în punctul A și până la refacerea frontului de undă CD. Diferența de drum optic este:

$$\delta = (L_3) - (L_2) = n(AB + BC) - (AD - \frac{\lambda}{2})$$

Raza (2) suferă reflexie pe un mediu mai dens și din această cauză “pierde”  $\lambda/2$ , adică suferă un salt de fază egal cu  $\pi$ . Exprimând segmentele  $AB=BC$  și  $AD$  în funcție de unghiul de incidență  $\alpha_i$ , de unghiul de refracție  $\alpha_t$  și de grosimea lamei  $d$ , se obține:

$$\delta = 2nd \cos \alpha_t + \frac{\lambda}{2} \quad (5.13)$$

În cazul incidenței normale ( $\alpha_i = 0$ ) și din legea refracției (5.3) rezultă  $\cos \alpha_t = 1$ , astfel că diferența de drum optic devine:

$$\delta = 2nd + \frac{\lambda}{2} \quad (5.14)$$

Toate razele paralele pot fi adunate într-un loc cu ajutorul unei lentile convergente și vor interfera, producând maxime sau minime, după cum diferența de drum optic este un număr par sau impar de semilungimi de undă.

Interferența produsă de lame subțiri are multe aplicații dintre care amintim straturile antireflex, pe de o parte, și straturile reflectoare, pe de altă parte. Straturile antireflex sunt pelicule subțiri depuse pe suprafața componentelor optice (lentile). Grosimea lor este astfel aleasă încât razele reflectate să fie stinse (diferența de drum dată de (5.14) să corespundă unui minim de interferență). Dacă, dimpotrivă, diferența de drum între razele reflectate pe fețele stratului corespunde unui maxim de interferență atunci razele reflectate sunt “întărite” și stratul este puternic reflectător (ogindă). O altă aplicație a interferenței în straturi subțiri se referă la realizarea filtrelor interferențiale, care permit trecere unei culori bine determinate prin filtru.

### 5.4 Difracția luminii

Obstacolele întâlnite de frontul de undă determină deformări ale acestuia și, ca rezultat, undele luminoase pătrund și în domeniul umbrei geometrice. Fenomenul se numește *difracție* și se explică cu ajutorul *principiului lui Huygens - Fresnel*. Conform acestui principiu, *fiecare element  $dS$  al suprafeței de undă  $\Sigma$  (fig.5.8) emite unde sferice secundare a căror amplitudine este proporțională cu aria  $dS$ ; amplitudinea rezultantă într-un punct oarecare de observare  $O$  se poate obține prin însumarea oscilațiilor provenite din diferite zone ale suprafeței  $\Sigma$ , ținând seama de fazele lor (interferența undelor secundare)*. În cazul surselor punctiforme, suprafețele de undă care se propagă în medii omogene și izotrope sunt sferice (fascicul divergent). Difracția undelor de acest tip se numește de tip Fresnel. Difracția luminii în fascicul paralel (suprafețe de undă plane) este cunoscută sub numele de difracție Fraunhofer.

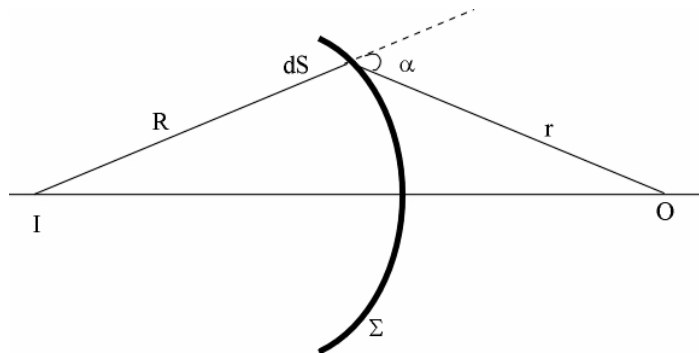


Fig. 5.8

Difracția printr-o fantă. Să considerăm o undă plană monocromatică incidentă normal pe un paravan în care este practică o fantă dreptunghiulară, având lungimea mult mai mare ca lățimea  $a$  (fig. 5.9). Razele difractate sub unghiul  $\theta$  față de direcția inițială vor interfera în planul focal al lentilei  $L$ , formând pe ecranul  $E$  o figură de difracție. Pentru studiul fenomenului de difracție în acest caz vom utiliza teoria zonală (Huygens - Fresnel).



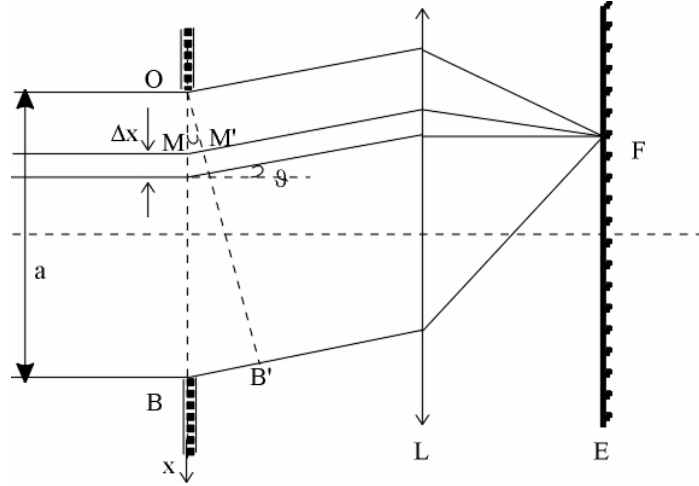


Fig. 5.9

Fie  $E_o$  amplitudinea vibrațiilor luminoase corespunzătoare întregului fascicul ce cade pe fanta de lățime  $a$ , considerată infinit de lungă. Diviznd suprafața de undă din dreptul fantei în fâșii paralele cu marginea fantei, amplitudinea undelor secundare provenind de la o fâșie de lățime  $dx$ , aflată la distanța  $x$  de marginea fantei, va fi:

$$E_x = \frac{E_o}{a} dx$$

Toate razele care trec prin fantă și sosesc în F vor avea între ele aceleași diferențe de faze pe care le au în planul  $OB'$ . Pentru raza care trece prin fantă la distanța  $x$  de marginea O diferența de drum față de raza care trece prin O este  $x \sin \theta$ , astfel că ecuația acestei unde va fi:

$$dE = \frac{E_o}{a} \cos(\omega t - kx \sin \theta) dx$$

Perturbația rezultantă în punctul F va fi dată de însumarea perturbațiilor provenind de la toate zonele elementare, iar intensitatea unei difractate după direcția  $\theta$  este:

$$I_d(\theta) = I_o \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)^2} \quad (5.16)$$

unde  $I_o$  este intensitatea luminii ce se propagă, de pe întreaga fantă, pe direcția  $\theta = 0$ . Pentru direcțiile care satisfac condiția:

$$\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta = m\pi \quad m = 0 ; \pm 1 ; \pm 2 \dots$$

adică:  $a \sin \theta = m\lambda$  (5.17)

intensitatea luminii este zero. Între aceste minime se dispun maximele de difracție, a căror poziție poate fi găsită prin anularea derivatei intensității dată de (5.16). Maximul central corespunde razelor nedeviate,  $\theta = 0$  (fig. 5.10).

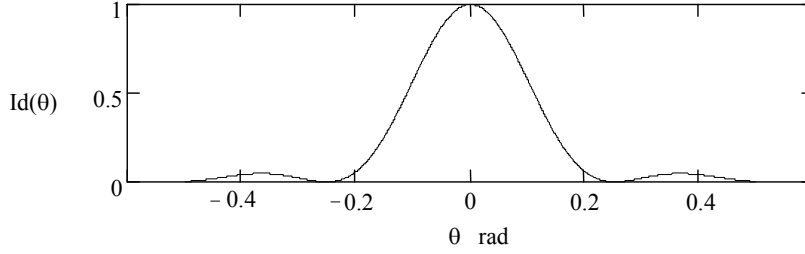


Fig. 5.10

Dacă lumina nu este monocromatică, pentru  $\theta = 0$  se obține maximul principal pentru orice lungime de undă; în mijlocul figurii de difracție se obține lumină albă, apoi benzi de diferite culori, cele violete fiind mai apropiate de centrul figurii decât cele roșii.

Rețeaua de difracție. O rețea de difracție este formată dintr-un ansamblu de  $N$  fante identice, paralele și echidistante (fig.5.11). Distanța  $d$  dintre două fante succesive se numește *constanta rețelei*. Cele  $N$  fante ale rețelei se pot interpreta ca fiind sursele a  $N$  fascicule coerente care au, pentru direcția  $\theta$ , diferența de fază între două unde succesive  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$ , corespunzătoare diferenței de drum  $d \sin \theta$ .

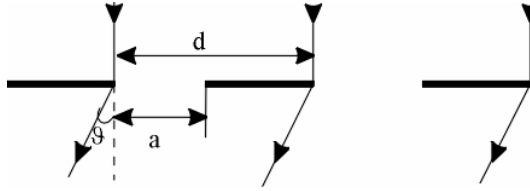


Fig. 5.11

Intensitatea fiecăreia din aceste unde, în direcția  $\theta$ , este cea rezultată în urma difracției prin fanta de lățime  $a$ . Cele  $N$  fascicule interferează, iar intensitatea luminii rezultate se poate afla calculând amplitudinea undei rezultante, de exemplu, prin metoda grafică, iar intensitatea rezultantă din interferența celor  $N$  fascicule este proporțională cu pătratul amplitudinii:

$$I_i(\theta) = I_1 \frac{\sin^2 \frac{N\varphi}{2}}{\sin^2 \frac{\varphi}{2}} \quad (5.20)$$

Pentru difracția în direcția  $\theta$ , mărimea  $I_1$  este chiar intensitatea obținută la difracția printr-o fantă, (5.16), astfel că intensitatea luminii difractate în direcția  $\theta$  de întreaga rețea este:

$$I(\theta) = I_o \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)^2} \frac{\sin^2\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)} \quad (5.21)$$

în care  $I_o$  este intensitatea luminii obținută de la fiecare fantă în direcția  $\theta = 0$ . În (5.21) ultima fracție (mare) (factorul de interferență) descrie variația datorată interferenței multiple a razelor care provin de la cele  $N$  fante ale rețelei, iar prima fracție descrie variația intensității datorită difracției printr-o fantă (factorul de difracție); difracția printr-o fantă “modulează” astfel intensitatea luminii rezultată din interferența multiplă.

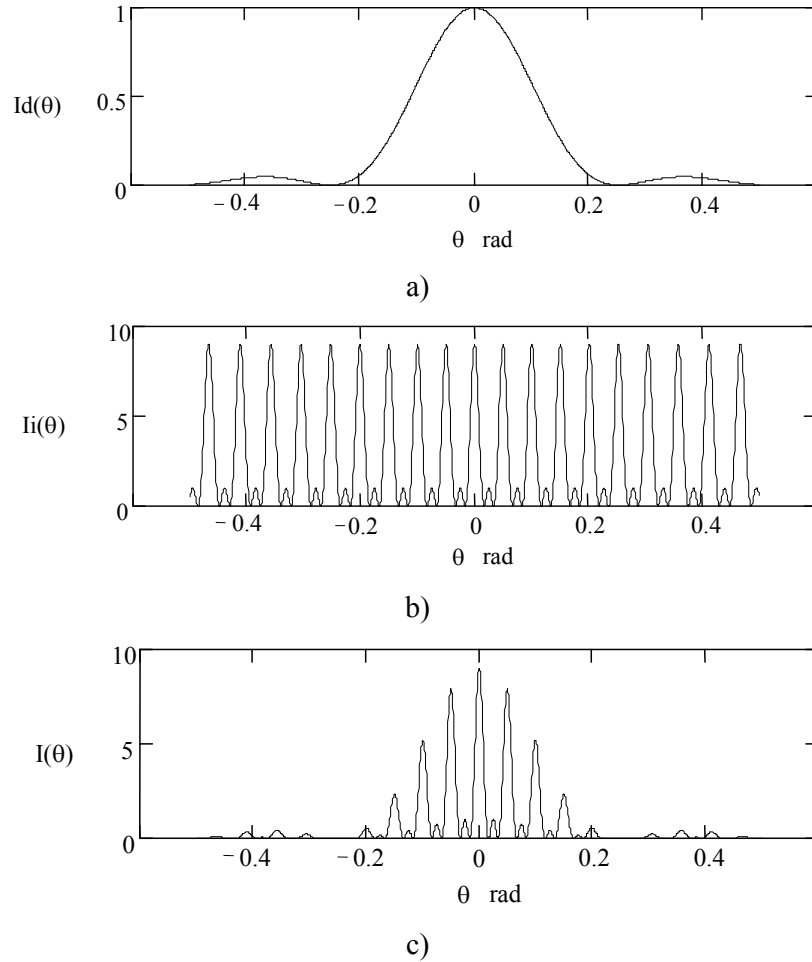


Fig.5.12

În fig. 5.12 au fost reprezentați factorul de difracție  $I_d(\theta)$  (fig. 5.12 a), factorul de interferență  $I_i(\theta)$  (fig. 5.12 b) și produsul lor  $I(\theta)$  (fig. 5.12 c). Se observă că maximele secundare de difracție printr-o fantă a rețelei sunt neglijabil de mici în comparație cu maximul central, astfel că figura de difracție prin întreaga rețea este dată practic de

porțiunea din figura de interferență multiplă cuprinsă în maximul principal de difracție. Maximele figurii de difracție sunt maximele principale ale interferenței multiple cuprinse în maximul principal de difracție printr-o fantă; poziția lor este dată de condiția:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad m = 0, 1, 2 \dots \quad (5.22)$$

Rețelele de difracție pot fi un șir de fante paralele și echidistante care lucrează prin transmisie (ca în cazul de mai sus) sau prin reflexie, un șir de centre de difuzie sau o rețea cu structură spațială, cum se prezintă o structură cristalină. “Curcubeul” care se vede privind suprafața unui compact disc este efectul difracției produsă prin reflexie de rețeaua formată de “șanțurile” circulare, cu distanța radială între ele de cca 1,60 μm, “șanțurile” fiind de fapt o succesiune de adâncituri a căror lungime variabilă codifică informația, adâncimea lor fiind de cca 0,1 μm. Rețeaua de difracție este piesa principală a spectrografelor cu rețea, utilizate pentru cercetarea radiației emise de diferite substanțe.

Holografia este o tehnică pentru înregistrarea și reproducerea imaginilor obiectelor pe cale interferențială. Spre deosebire de imaginile bidimensionale realizate prin fotografie sau televiziune, imaginea holografică este tridimensională. O astfel de imagine poate fi cercetată din diferite direcții spre a vedea laturi diferite ale obiectului. Pentru obținerea hologramei, obiectul este iluminat cu lumină monocromatică și coerentă, furnizată de o sursă laser, iar lumina reflectată de obiect ajunge pe o placă fotografică, unde se suprapune cu lumina care sosește direct de la sursă, producând interferență. Pe film se imprimă o imagine complexă de interferență, în locurile de maxim filmul fiind mai înnegrit. Pentru a vedea imaginea obiectului, filmul se iluminează cu aceeași lumină monocromatică și coerentă de la o sursă laser, ca și la înregistrare.

Să considerăm, pentru simplitate, că obiectul de holografiat este un punct P (fig. 5.13). Undele luminoase plane care sosesc direct de la sursă se suprapun pe film cu undele sferice difuzate de obiect, în acest caz punctul P. Din interferența lor în planul filmului, vor rezulta maxime și minime sub forma unor cercuri concentrice.

După dezvoltarea filmului și obținerea pozitivului, inelele de maxim vor corespunde zonelor transparente ale filmului. Pentru redare, se iluminează filmul (holograma) cu unde luminoase monocromatice plane, de aceeași lungime de undă ca la înregistrare.

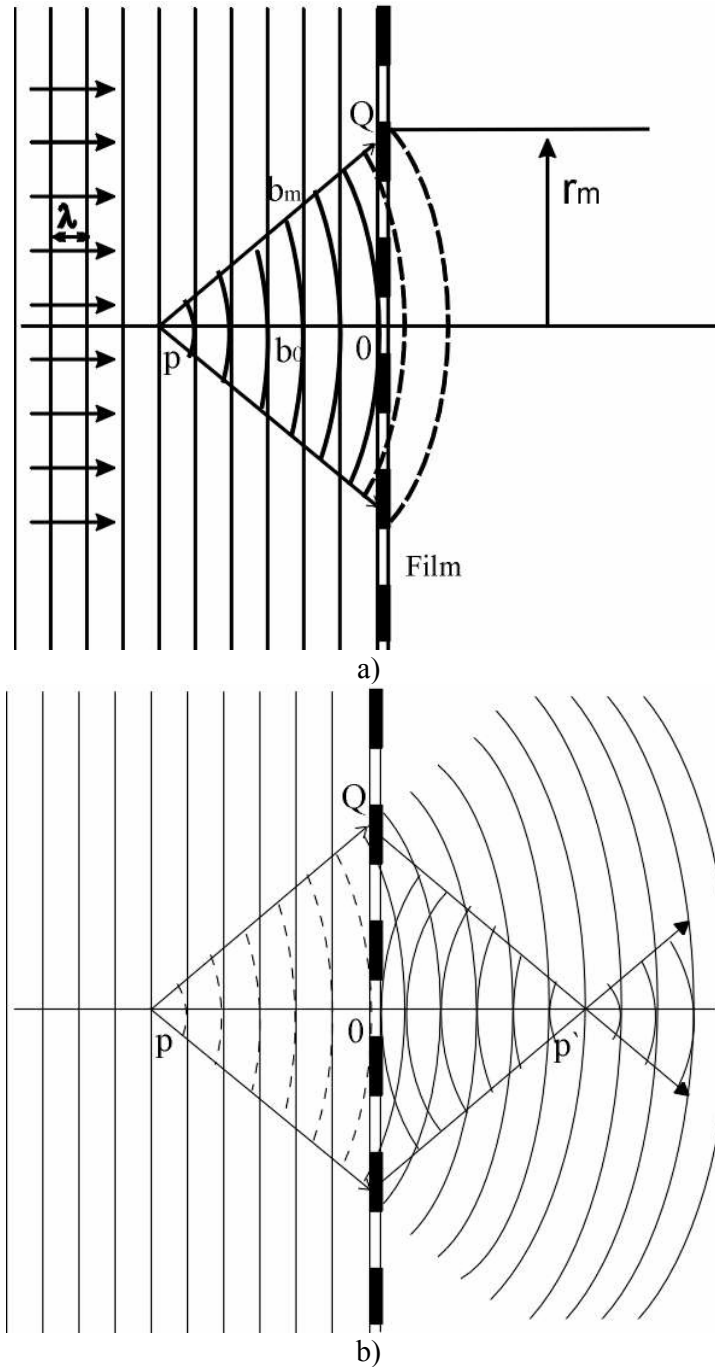


Fig. 5.13

Intr-un punct  $P'$ , aflat pe axa normală la film în centrul său, vor ajunge razele difractate în zonele cercurilor transparente ale filmului, având diferențe de drum între ele egale cu un număr întreg de lungimi de undă. În  $P'$  se obține un maxim de difracție și astfel  $P'$  devine *imagea reală* a punctului obiect P. În același timp, din interferența undelor secundare care pornesc din zonele transparente ale hologramei se formează unde sferice care au centrul în punctul P. Astfel punctul P

este *imaginea virtuală* a obiectului P, de la înregistrare. Prin urmare, la iluminarea hologramei se obține o imagine reală situată dincolo de film și o imagine virtuală situată între sursa de lumină și film.

Pentru realizarea hologramelor este necesară lumină care să manifeste coerență pe distanțe mari în comparație cu dimensiunea obiectelor de înregistrat și cu distanța până la film. Lumina surselor clasice nu îndeplinește această condiție și de aceea este absolut necesară utilizarea surselor laser.

### 5.5 Difuzia luminii

Când o undă luminoasă străbate un mediu, câmpul electromagnetic al undei interacționează cu particulele mediului, energia undelor fiind absorbită de acestea și apoi reemisă, lumina fiind astfel împrăștiată (difuzată) în toate direcțiile. Reflexia luminii este, din punct de vedere microscopic, o difuzie a luminii de către un număr mare de centri difuzanți aflați la distanțe mici unii de alții, în comparație cu lungimea de undă. Refracția este un fenomen similar în care lumina difuzată interferează cu cea incidentă. Termenul de difuzie (scattering) este totuși uzual pentru situația în care centrii de difuzie nu se află la distanțe mici față de lungimea de undă a luminii. Un astfel de exemplu este cel oferit de razele de soare care pătrund într-o cameră întunecată, în care particulele de praf din atmosferă pot fi observate ca puncte strălucitoare datorită luminii difuzate.

O particulă difuzantă absoarbe lumina și o reemite ca un dipol oscilant. Să considerăm o rază de lumină care se propagă în direcția Oz și care întâlnește în origine o particulă difuzantă (fig. 5.14). Sub acțiunea câmpului electric al undei luminoase, sarcinile electrice ale particulei vor efectua oscilații și, ca urmare, vor emite radiații electromagnetice. În unda luminoasă, oscilațiile vectorului câmp electric se fac în toate direcțiile perpendiculare pe direcția de propagare, dar ele pot fi descompuse după două direcții, Ox și Oy, astfel că particula difuzantă este echivalentă cu doi dipoli care oscilează pe direcții perpendiculare. Se știe că la distanță mare de dipol radiația emisă de acesta se propagă sub forma unei unde plane, în care vectorul câmp electric emis este paralel cu direcția de oscilație a dipolului, iar în lungul direcției de

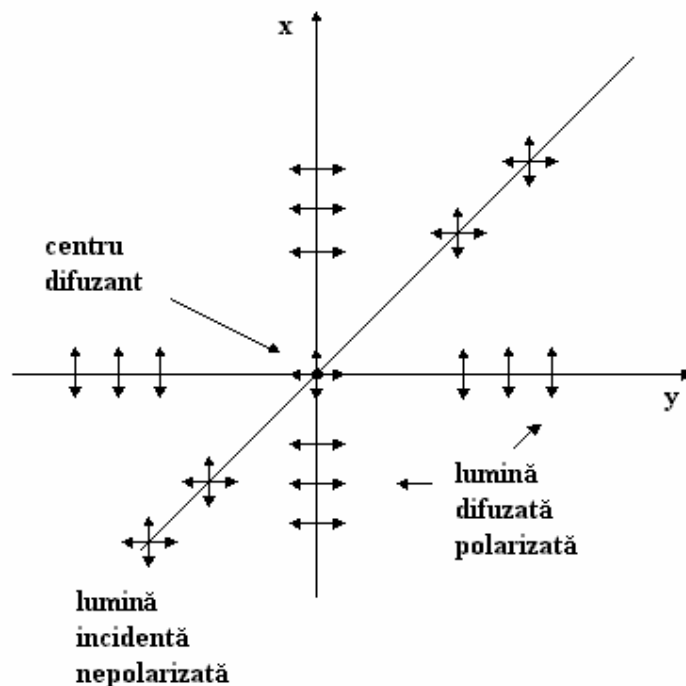


Fig. 5.14

oscilație dipolul nu emite. Dacă privim perpendicular pe fascicul, de exemplu, în direcția  $Ox$ , vom vedea lumina radiată de dipolul care oscilează după direcția  $Oy$ , vectorul câmpului electric în lumina difuzată în această direcție fiind orientat paralel cu  $Oy$ . Dacă privim în direcția  $Oy$ , vom vedea lumina radiată de dipolul care oscilează după direcția  $Ox$ , vectorul câmpului electric în lumina difuzată în această direcție fiind orientat paralel cu  $Ox$ . În direcția  $Oz$  radiază ambii dipoli echivalenți din  $O$ , astfel că în radiația emisă în această direcție câmpul electric oscilează atât după  $Ox$  cât și după  $Oy$ .

Fenomenul de difuzie este caracteristic propagării luminii prin medii neomogene. În cazul mediilor omogene, undele secundare emise în toate direcțiile interferă, anulându-se reciproc, intensitatea luminii fiind practic diferită de zero numai în direcția de propagare. În cazul mediilor neomogene caracterizate de fluctuații ale indicelui de refracție (ca urmare a fluctuațiilor densității, orientării moleculelor, prezenței altor particule) intensitatea luminii va fi diferită de zero și pe direcții diferite de direcția de propagare, ca urmare a proceselor de difuzie.

Se pot distinge mai multe tipuri de difuzie. Dacă particulele difuzante au diametrul mai mic decât  $\lambda/10$  ( $\lambda$  - lungimea de undă a luminii) este vorba de *difuzie de tip Rayleigh*, pentru care intensitatea luminii difuzate într-o anumită direcție este invers proporțională cu puterea a patra a lungimii de undă:  $I \sim 1/\lambda^4$ . Pentru particule cu dimensiune mai mare ca lungimea de undă, *difuzia* se numește *de tip Mie*, iar intensitatea luminii difuzate este invers proporțională cu puterea a doua a lungimii de undă:  $I \sim 1/\lambda^2$ . Un alt tip de difuzie

observat experimental este *difuzia moleculară*, care se produce în medii optic pure, dar care prezintă fluctuații ale densității. Intensitatea luminii difuzate în acest caz este, de asemenea, invers proporțională cu puterea a patra a lungimii de undă. Un astfel de exemplu este difuzia produsă de aglomerările moleculelor din aer (datorate fluctuațiilor densității aerului) care difuzează mai mult radiațiile cu lungime de undă mică, rezultând astfel culoarea albastră a cerului. Culoarea cerului înspre soarele aflat la apus apare galben-roșiatică deoarece în lumina care vine de la soare și străbate atmosfera radiațiile albastre sunt împrăștiate prin difuzie, rămânând predominante cele cu lungime de undă mare (înspre roșu).

Norii conțin o mare concentrație de picături fine de apă sau cristale de gheață, care difuzează lumina. Din cauza acestei mari concentrații, toate lungimile de undă din lumina care străbate norul sunt puternic difuzate și norul apare alb. Un fenomen asemănător explică culoarea albă a laptelui datorată difuziei produsă de moleculele grăsimii din lapte. În laptele “slab”, centrii difuzanți fiind împuținați, este difuzată practic numai radiația albastră, de unde rezultă și culoarea albastruie a acestuia.

Procese de difuzie determină scăderea intensității luminii incidente, după o lege asemănătoare legii absorbției:

$$I = I_0 e^{-\mu_d x} \quad (5.24)$$

unde  $\mu_d$  este un coeficient de atenuare datorită difuziei, iar  $x$  este distanța parcursă prin mediu.

## 5.6 Dispersia luminii

Lumina albă este o superpoziție de unde luminoase cu lungime de undă extinsă în tot spectrul vizibil. Viteza luminii în vid este aceeași pentru toate lungimile de undă, dar în materiale ea diferă de la o lungime de undă la alta. De aceea și indicele de refracție depinde de lungimea de undă. *Fenomenul determinat de dependența indicelui de refracție al mediului de lungimea de undă a luminii (sau, corespunzător de frecvență) se numește dispersie a luminii.* Fenomenul de dispersie a fost studiat pentru prima oară de către Newton, observând trecerea unui fascicul de lumină albă (naturală) printr-o prismă, având ca rezultat descompunerea luminii în culorile componente. (fig. 5.15). Se vede că radiațiile sunt refractate din ce în ce mai mult pe măsură ce crește frecvența lor (de la roșu către violet).

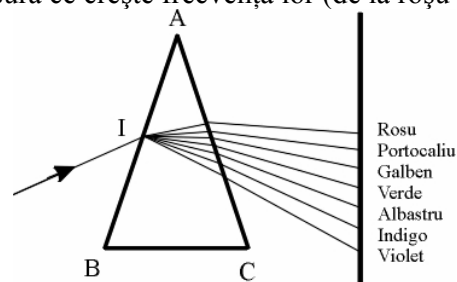


Fig. 5.15



Se știe că propagarea undei electromagnetice într-un mediu se caracterizează prin viteza de propagare  $v$  sau prin indicele de refracție absolut al mediului,  $n = c/v = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$  (vezi relația (4.9)), în care  $\epsilon_r$  și  $\mu_r$  sunt permitivitatea dielectrică relativă și respectiv permeabilitatea magnetică relativă a mediului. Pentru mediile dielectrice în care se propagă lumina,  $\mu_r \cong 1$  astfel că:

$$n \cong \sqrt{\epsilon_r} \quad (5.25)$$

Dependența indicelui de refracție de frecvență,  $n(\omega)$  (deoarece pulsația  $\omega$  este egală cu frecvența înmulțită cu factorul constant  $2\pi$ , adesea ne vom referi la frecvență prin mărimea  $\omega$ ), poate fi explicată dacă se ține seamă că, sub acțiunea câmpului electric al undei luminoase, sarcinile electrice (electroni, ioni) din mediu oscilează forțat, rezultând deplasarea sarcinilor și polarizarea electrică a substanței. Departate de regiunea de absorbție, în zonele de transparență, indicele de refracție crește cu creșterea frecvenței și dispersia de acest tip se numește *normală*. Pentru acest caz, dependența indicelui de refracție de lungimea de undă poate fi reprezentată, într-o aproximație suficient de bună, prin *relația lui Cauchy*:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (5.34)$$

unde constantele  $A, B, C$  pot fi obținute din măsurători experimentale ale lui  $n$  pentru trei lungimi de undă (culori) diferite.

Fenomenul de dispersie are, între altele, aplicație la realizarea aparatelor spectrale, care descompun lumina albă în culorile componente prin dispersia produsă de o prismă. De asemenea, producerea curcubeului la reparația soarelui după ploaie, se explică prin combinarea efectelor de dispersie, reflexie și refracție a luminii în picăturile fine de apă din atmosferă. Razele soarelui, care vin din spatele observatorului, sunt întoarse spre acesta după o reflexie în interiorul unei picături de apă și în același timp sunt dispersate (fig. 5.16 a), astfel că se realizează un curcubeu având culoarea roșie dispusă spre exterior (curcubeul primar). Pentru razele care suferă două reflexii în interiorul picăturii, dispunerea culorilor se inversează și se produce curcubeul secundar, deasupra celui primar (fig. 5.16 b)

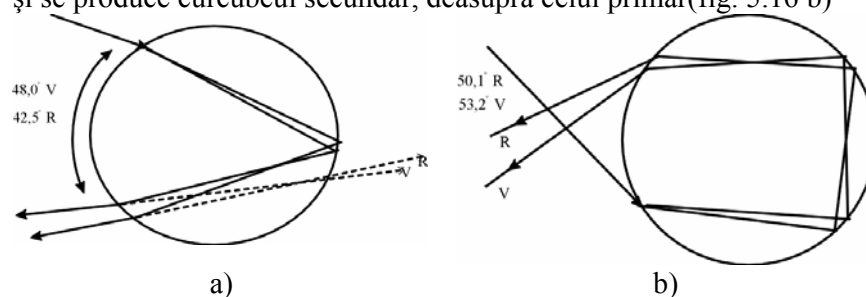


Fig. 5.16

## 5.7 Polarizarea luminii

Polarizarea este o caracteristică a tuturor undelor transversale. Lumina, ca radiație electromagnetică, este și ea o undă transversală, direcțiile de oscilație ale vectorilor câmp electric și magnetic fiind perpendiculare pe direcția de propagare a luminii.

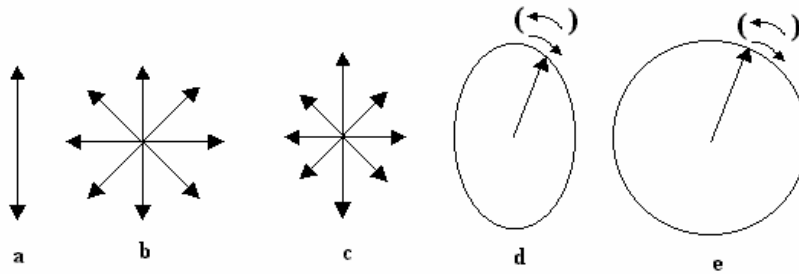


Fig. 5.17

Numim *plan de polarizare* a luminii planul ce conține direcția de vibrație a vectorului  $\vec{E}$  și direcția de propagare. Unda luminoasă al cărei vector  $\vec{E}$  este conținut mereu într-un singur plan se numește *liniar polarizată* (fig. 5.17 a). Lumina *naturală* nu conține nici o direcție privilegiată de vibrație, de aceea se numește *nepolarizată* (fig. 5.17 b). Undele elementare (trenuri de undă) emise de fiecare atom dintr-o sursă de lumină pot fi liniar polarizate, planele de polarizare sunt însă orientate de la un atom la altul pe altă direcție și lumina sursei este astfel nepolarizată. La trecerea luminii prin anumite medii se constată că anumite direcții de vibrație sunt favorizate față de direcțiile perpendiculare; în consecință, intensitatea luminii după cele două direcții are valori diferite,  $I_1$  și  $I_2$ . În acest caz spunem că lumina este parțial polarizată (fig. 5.17 c). Numim *grad de polarizare* mărimea:

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (5.35)$$

Pentru lumina naturală  $I_1 = I_2$  și deci  $P = 0$ ; pentru lumina liniar (total) polarizată  $P = 1$  iar pentru  $0 < P < 1$  lumina este parțial polarizată.

În general, vectorul câmp electric, ce vibrează într-un plan perpendicular pe direcția de propagare, nu are aceeași direcție în acest plan, aceasta poate depinde de timp. Ca urmare, vârful vectorului câmp electric descrie o traiectorie eliptică în acest plan, care generează în cursul propagării o spirală eliptică. Se spune în acest caz, că unda luminoasă este *polarizată eliptic* (fig. 5.17 d). Acest fapt poate fi înțeles dacă observăm că oscilația câmpului electric ce se efectuează pe o direcție la un moment dat, poate fi descompusă în două oscilații perpendiculare. Dacă între cele două componente există o diferență de fază, la compunerea lor rezultă, în general, o traiectorie eliptică. Dacă

diferența de fază dintre cele două vibrații este un număr impar de  $\pi/2$  și vibrațiile au aceeași amplitudine, atunci traiectoria rezultantă a vârfului vectorului câmp electric este un cerc iar unda luminoasă se numește *circular polarizată* (fig.5.17 e). Pe traiectoria eliptică sau circulară, vârful vectorului luminos se poate roti spre dreapta sau spre stânga. Polarizarea liniară rezultă în cazul particular când diferența de fază dintre cele două componente este un multiplu de  $\pi$ .

#### Metode de obținere a luminii polarizate.

Polarizarea prin dicroism (absorbție selectivă). Filtrele polarizatoare pentru unde electromagnetice se realizează în felurite moduri, în funcție de lungimea de undă a undelor. Astfel, pentru microunde, având lungimea de undă de câțiva centimetri, un polarizor bun se poate realiza sub forma unui panou de fire metalice (conductoare), paralele, izolate între ele. Sub acțiunea componentei paralele cu firele a câmpului electric al undei, electronii din fire vor fi antrenați în lungul acestora și vor genera un curent electric ce produce încălzirea firelor, ca urmare a efectului Joule. Energia termică disipată provine de la componenta paralelă cu firele a câmpului electric al undelor electromagnetice, a cărei amplitudine va scădea. Componenta perpendiculară pe fire rămâne neafectată, deoarece electronii nu se pot mișca pe această direcție (nu pot “sări” de pe un fir pe altul). În acest fel microundele care străbat grătarul vor fi polarizate, cu vibrații ale câmpului electric predominant pe direcție perpendiculară pe fire.

Proprietatea unor materiale de a absorbi în mod diferit vibrațiile luminoase care se efectuează pe direcții diferite se numește *dicroism*. Astfel de materiale sunt utilizate pentru confecționarea filtrelor polarizatoare pentru lumină, *polaroizi*. O placă polaroid este realizată dintr-un material plastic, conținând lanțuri hidrocarbonice lungi, aliniate după o direcție în procesul de laminare al plăcii. Placa este introdusă apoi într-o soluție de iod. Iodul se atașează lanțurilor hidrocarbonice și furnizează electronii de conducție, care pot mișca în lungul direcției de întindere. Componenta câmpului electric al undei luminoase de-a lungul direcției de întindere este absorbită iar cea perpendiculară este transmisă, întocmai ca în cazul filtrului polarizor de microunde.

Un filtru polarizor ideal transmite integral vibrația luminoasă pe o direcție, *axa* polarizorului, și le stinge complet pe toate celelate. Intensitatea luminii care străbate polarizorul este jumătate din cea a luminii naturale incidente pe polarizor. Într-adevăr, câmpul  $\vec{E}$  al undei incidente pe polarizor poate fi descompus după o direcție paralelă cu axa polarizorului și alta perpendiculară pe ea. Deoarece lumina incidentă este un amestec de toate stările de polarizare, cele două componente sunt, în medie, egale; fiecărei componente îi corespunde o intensitate egală cu jumătate din cea a undei incidente, iar polarizorul lasă să treacă doar una dintre ele.

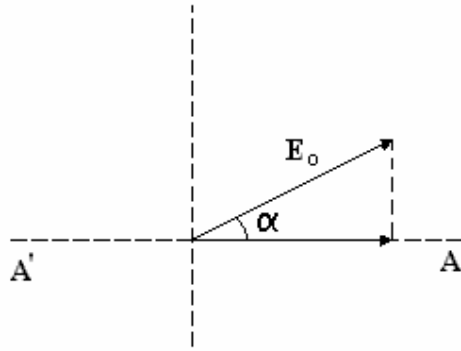


Fig. 5.18

Să considerăm că lumina care a străbătut un polarizor întâlnește un al doilea polarizor, a cărui axă de transmisie face unghiul  $\alpha$  cu a celui dintâi. Al doilea polarizor, datorită funcției pe care o îndeplinește, se numește analizor. Lumina polarizată liniar, de amplitudine  $E_o$ , care a străbătut polarizorul (primul) poate fi descompusă într-o componentă paralelă cu axa analizorului,  $E_o \cos \alpha$ , și alta perpendiculară pe ea (fig. 5.18). Prin analizor va străbate numai componenta paralelă cu axa sa. Deoarece intensitatea luminii este proporțională cu pătratul amplitudinii, vom obține:

$$I = I_o \cos^2 \alpha \quad (5.36)$$

în care  $I_o$  este intensitatea luminii total polarizate ce cade pe analizor, iar  $I$  este intensitatea luminii care străbate analizorul, a cărui axă face unghiul  $\alpha$  cu cea a polarizorului. Relația (5.36) exprimă *legea lui Malus*.

Polarizarea prin reflexie. Să considerăm o undă luminoasă plană monocromatică, incidentă pe suprafața de separație plană dintre două medii transparente. Față de planul de incidență, orientarea vectorului luminos este oarecare, dar acest vector poate fi descompus după o direcție perpendiculară pe plan și alta paralelă cu planul. Într-o rază de lumină naturală vectorul luminos vibrează cu aceeași amplitudine în toate direcțiile din planul perpendicular pe direcția de propagare, dar pentru toate aceste direcții se poate realiza descompunerea ca mai sus, rezultând, pentru lumina naturală, componente egale, în planul de incidență și perpendicular pe acest plan. Experiența arată, iar teoria electromagnetică poate descrie acest fapt, că cele două componente, în general, nu rămân egale în urma reflexiei și refracției luminii. Ca urmare a acestei asimetrii, lumina reflectată, ca și cea transmisă (refractată), este polarizată. Dacă unghiul de incidență al luminii naturale (nepolarizate) este astfel ca raza reflectată să fie perpendiculară pe cea transmisă, se constată că raza reflectată este total polarizată (polarizată liniar) (fig 5.19), în urma reflexiei nu rămân decât vibrațiile luminoase perpendiculare pe planul de incidență; raza transmisă este parțial polarizată.

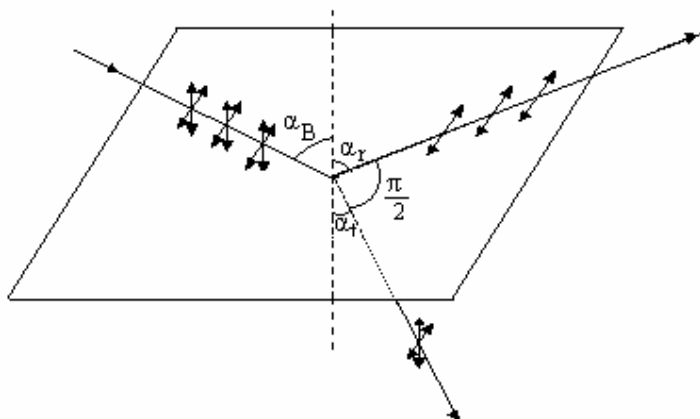


Fig. 5.19

Unghiul de incidență pentru care se întâmplă aceasta se numește unghi Brewster,  $\alpha_B$ , și se poate obține din legea refracției observând că  $\alpha_r + \alpha_t = \pi/2$  și  $\alpha_i = \alpha_r$ :

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_t} = \frac{\sin \alpha_B}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_B)} = \operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (5.36)$$

Polarizarea prin reflexie justifică utilizarea ochelarilor de soare cu filtre de polarizare. Lumina solară, reflectată de suprafețe orizontale (asfaltul unei șosele, suprafața apei unui lac, etc) este polarizată, cu vibrații în plan orizontal. Filtrele ochelarilor sunt astfel realizate încât să transmită numai lumina care vibrează în plan vertical, obținându-se astfel atenuarea luminii care ajunge la ochi.

Polarizarea prin difuzie. Se știe că difuzia luminii de către particulele mediului se realizează prin absorbția și reemisia undei de către particule, care se comportă ca niște dipoli oscilanți. După cum se observă din (fig. 5.14) radiația rezultată din prima împrăștiere, difuzată la  $90^\circ$  față de direcția razei incidente (de exemplu, în direcțiile Ox și Oy), este total polarizată, iar în direcția razei incidente lumina este nepolarizată.

Polarizarea prin dublă refracție (birefringența). În general, lichidele, solidele amorfе de tipul sticlei, solidele cristaline cu structură cu simetrie cubică sunt *optic izotrope*, adică proprietățile lor optice (viteza de propagare a luminii, deci și indicele de refracție) sunt independente de direcție sau de starea de polarizare. Multe alte solide cristaline sunt *optic anizotrope*. Cristalele ale căror proprietăți prezintă o simetrie de rotație în raport cu o axă se numesc *uniaxiale*. De-a lungul acestei axe, viteza de propagare a luminii nu depinde de orientarea vectorului luminos  $\vec{E}$ , iar axa se numește *axă optică*. Astfel de cristale sunt spatul de Islanda (calcit, varietate de  $\text{CaCO}_3$ ), cuarțul, azotatul de sodiu, gheața etc. Se numește plan principal (secțiune principală) al cristalului un plan care conține axa optică, AO.

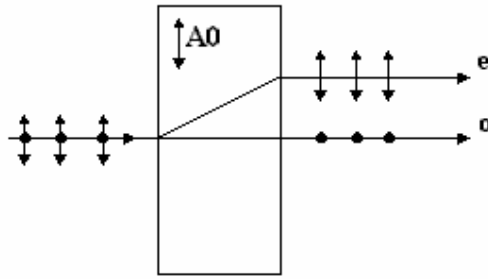


Fig. 5.20

Se constată experimental că dacă o rază de lumină naturală cade pe fața unui cristal uniaxial apare fenomenul de *birefrință* sau *dublă refracție*, care constă în apariția a două raze care se refractă pe direcții diferite: una, numită *rază ordinară*, care respectă respectă legile refracției, iar a doua, deviată se numește *rază extraordinară* (fig. 5.20) Cele două raze sunt polarizate în plane perpendiculare: în raza ordinară oscilațiile au loc perpendicular pe planul principal, iar în cea extraordinară oscilațiile au loc în plan paralel cu cel al secțiunii principale.

Pentru explicarea birefrinței se ține seamă că cristalul poate fi considerat drept un ansamblu de oscilatori elementari, excitați de câmpul electric al undei. În general oscilatorii elementari sunt anizotropi. La unele substanțe orientarea acestor oscilatori este dezordonată, ceea ce dă în ansamblu un caracter izotrop mediului. La substanțele care produc birefrință, oscilatorii elementari au orientări preferențiale, ceea ce aduce după sine o anizotropie a mediului, în ansamblu.

Birefrința circulară (rotirea planului de polarizare) Se constată experimental că la propagarea în anumite medii, numite *optic active*, a luminii polarizate circular, viteza de propagare a undei polarizată circular dreapta este diferită de cea a undei polarizată circular stânga. Întrucât o undă polarizată liniar se poate descompune în două unde polarizate circular, una - spre dreapta, alta-spre stânga, după străbaterea unui astfel de mediu, va rezulta o rotire a planului de polarizare al undei polarizată liniar. Experiența arată că unghiul de rotație a planului de polarizare este proporțional cu distanța străbătută în mediu, invers proporțional cu lungimea de undă a luminii, depinde de temperatură, iar în cazul soluțiilor substanțelor optic active în lichide inactive, unghiul este proporțional cu concentrația:

$$\alpha = C_{(T)} \frac{1}{\lambda} lc = C_{(T,\lambda)} lc, \quad (5.37)$$

$C$  fiind puterea rotatorie, specifică substanței. Rotirea planului de polarizare de către substanțele optic active este determinată de structura asimetrică a acestora. Toate cristalele optic active nu prezintă nici plan nici centru de simetrie și pot exista sub două forme, dextrogiră și levogiră, una fiind imaginea în oglindă a celeilalte. Astfel de substanțe sunt cuarțul, cinabrul, cristalele de zahăr. În cazul lichidelor sau gazelor optic active, activitatea nu mai este legată de o

disimetrie de aranjare a moleculelor și de disimetria moleculelor înseși.

***Intrebări pentru verificarea cunoștințelor și pentru evaluare:***

1. Enunțați legile reflexiei și refracției.
2. Explicați ce se înțelege prin reflexie totală și scrieți expresia unghiului limită.
3. Scrieți condițiile de maxim la interferența a două raze de lumină.
4. Enunțați principiul Huygens-Fresnel.
5. Ce este o rețea de difracție? Condiția de maxim la difracția pe rețea.
6. Descrieți o experiență prin care se evidențiază dispersia luminii.
7. Explicați ce înseamnă lumină polarizată. Ce tipuri de polarizare cunoașteți?